

**ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА СУЧАСНОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО
ПРИЛАДОБУДУВАННЯ**

УДК 539.3

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ У
МЕМБРАНІ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО СЕНСОРА ТИСКУ**

Тихан М. О.

Національний університет “Львівська політехніка”

м. Львів, Україна

E-mail: tykhanm@ukr.net

Стаття присвячена експериментальному дослідженню температурного поля у мембрані тензорезистивного сенсора тиску при термоударі. Необхідність таких досліджень виявилась у зв'язку з розробленням спеціальних способів вимірювання тиску в середовищах з нестационарними термовпливами. В роботі подаються головні теоретичні аспекти для проведення досліджень, зокрема подається аналітичне рівняння, що описує нестационарне температурне поле у мембрані. Далі описується обладнання та хід експериментальних досліджень характеру цього поля при термоударі та показані результати досліджень екземпляра сенсора, призначеного для вимірювання тиску при нестационарному термовпливі.

Ключові слова: тензорезистивний, сенсор, тиск, нестационарний, термовплив, дослідження.

Вступ.

В багатьох сучасних високотехнологічних галузях промисловості (автомобілебудування, аерокосмічний комплекс, військовий сектор тощо) системи управління потребують сенсорів тиску, які можуть працювати в середовищах з широким діапазоном зміни своєї температури. На сьогодні для середовищ зі змінною температурою найкраще зарекомендували себе сенсори побудовані на базі мікроелектронних технологій [1, 2].

Однак наріжною вимогою сучасних вимірювальних задач є забезпечення високої точності вимірювання тиску при швидкозмінній температурі. В таких умовах амплітуда температурної складової похибки може сягати 30%, а інколи і більше [1-4]. Проте сучасні системи вимагають щоби точність вимірювання тиску була в межах класу точності сенсорів. Таке завдання вдалось вирішити за допомогою спеціальних методів вимірювання [5, 6]. Своєю чергою, для реалізації цих методів необхідно створення спеціальних сенсорів, що очевидно потребує відповідної експериментальної перевірки теоретичних засновків при моделюванні термомеханічних процесів у таких сенсорах.

Принципова конструкційна схема тензометричного сенсора тиску містить первинний сприймаючий елемент – мембрану у вигляді круглої пластини, що жорстко защемлена у масивному корпусі, а механо-електричні перетворювачі-тензорезистори утворюють спеціальними технологіями на мембрані (рис. 1).

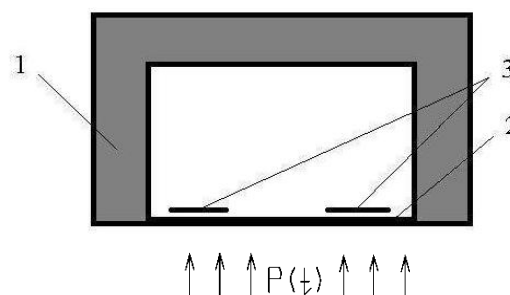


Рис. 1. Конструкційна схема типового тензометричного сенсора тиску: 1 – корпус, 2 – мембрана, 3 – тензорезистори

Постановка задачі

Наріжною передумовою працездатності сучасних методів вимірювання тиску за умов нестационарних термовпливів є необхідність рівномірності температурного поля по радіусу мембрани [5, 6]. Теоретично таке можна досягнути мінімізацією теплообміну між корпусом та мембраною. Практично, таку мінімізацію можна здійснити спеціальним підбором матеріалів мембрани і корпусу сенсора, або ж термоізоляцією мембрани по периметру. Тому метою роботи є експериментальне підтвердження теоретичних аспектів моделювання теплових процесів у мембрані сенсора, експериментальна перевірка практичних шляхів реалізації теоретичних засновків і перевірка працездатності розробленого сенсора.

Теоретичні аспекти термомеханічних процесів у мембрані сенсора

Покладаємо, що мембрана є круглою пластинкою з радіусом R , товщиною h , яка виконана з ізотропного матеріалу, модуль пружності якого E , густина ρ , коефіцієнт Пуасона ν , теплофізичні сталі: коефіцієнт теплопровідності K , питома теплоємність c , коефіцієнт температуропровідності- $\chi = \frac{K}{\rho \cdot c}$. Також вважається, що деформації, які ви-

кликані в пластинці температурою, допускають застосування закону Гука і на основі принципу суперпозиції можуть бути розраховані окремо.

Динаміка нестационарного температурного поля $T(r, z, t)$ у мембрані при межових умовах, за яких на всіх поверхнях мембрани відбувається конвективний тепловий обмін з середовищами зі змінними температурами описується рівнянням [7]

$$T(r, z, t) = \tilde{\Theta} + \sum_{i=1}^{\infty} A_i Z_i(\mu_i \zeta) \left\{ \bar{\Theta}_1 + \exp(-p \mu_i^2 \tau) \sum_{n=1}^{\infty} B_n J_0(\beta_n \rho) \times \right. \\ \left. \times \left[\Theta_0^* - \int_0^{\tau} Q^* \cdot \exp[(\beta_n^2 + p \mu_i^2) \tau'] d\tau' \right] \exp(-\beta_n^2 \tau) \right\} \quad (1)$$

при межових і початковій умовах

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + h_1(T(r, z, t) - \Theta_1(t)) &= 0 \quad \text{при } r = R \\ \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} + h_2(T(r, z, t) - \Theta_2(t)) &= 0 \quad \text{при } z = l \\ \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} - h_3(T(r, z, t) - \Theta_3(r, t)) &= 0 \quad \text{при } z = 0 \\ T(r, z, t) &= \Theta_0 = \text{const} \quad \text{при } t = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

$$\text{де } \tilde{\Theta} = \Theta_2 + \frac{\lambda_3(1 + \lambda_2) - \lambda_2 \lambda_3 \zeta}{\lambda_2 + \lambda_3(1 + \lambda_2)} (\Theta_3 - \Theta_2), \quad (3)$$

$\Theta_1(t), \Theta_2(t), \Theta_3(r, t)$ - температури середовищ, що контактують з боковою, зовнішньою та внутрішньою поверхнями мембрани; $\lambda_1 = l_1 \cdot R$; $\lambda_{2,3} = l_{2,3} \cdot h$ - нормовані коефіцієнти теплообміну на периметрі та зовнішній і внутрішній поверхнях мембрани;

$\zeta = \frac{z}{h}$; $\Delta T = 400^\circ \text{C}$; $0 \leq z \leq h$ - координата по товщині мембрани; $0 \leq r \leq R$ - координата по площині мембрани;

$$Z(\mu_i \zeta) = \cos(\mu_i \cdot \zeta) + \frac{\lambda_3}{\mu_i} \sin(\mu_i \cdot \zeta); \quad \mu_i \text{ є коренями}$$

трансцендентного рівняння

$$\text{tg} \mu_i = \frac{\lambda_2 + \lambda_3}{\mu_i^2 - \lambda_2 \lambda_3} \mu_i; \quad \tau = \frac{\chi \cdot t}{R^2}; \quad p = \frac{R^2}{h^2};$$

$$\rho = \frac{r}{R}; \quad \bar{\Theta}_k = \int_0^1 \Theta'_k \cdot Z d\zeta \quad (k = 0, 1);$$

$$A_i = \left[\int_0^1 Z^2 d\zeta \right]^{-1} = \\ = \frac{2\mu_i^2(\mu_i^2 + \lambda_2^2)}{(\lambda_2 + \lambda_3)(\mu_i^2 + \lambda_2 \lambda_3) + (\mu_i^2 + \lambda_2^2)(\mu_i^2 + \lambda_3^2)};$$

$$B_n = \frac{-\pi^2 \beta_n^2}{2}, \text{ а } \beta_n \text{ - корені рівняння } \frac{\beta_n J_1(\beta_n)}{J_0(\beta_n)} = \lambda_1;$$

$$Q^* = \int_0^1 \rho Q^0 J_0(\beta_n \rho) d\rho; \quad \Theta_0^* = \int_0^1 \rho \Theta_0^0 J_0(\beta_n \rho) d\rho;$$

$$Q^0 = \bar{Q} - \left(\frac{d}{d\tau} + p \cdot \mu_i^2 \right) \bar{\Theta}_1; \quad \bar{Q} = \int_0^1 Q \cdot Z d\zeta; \quad Q = \Delta \tilde{\Theta};$$

$$\Theta'_1 = \Theta_1 - \left(\frac{1}{\lambda_1} \frac{\partial}{\partial \rho} + 1 \right) \tilde{\Theta} \Big|_{\rho=1}; \quad \Theta_0^0 = \bar{\Theta}_0 - \bar{\Theta}_1 \Big|_{\tau=0};$$

$$Q = \Delta \tilde{\Theta};$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} - \frac{\partial}{\partial \tau}; \quad \Theta_0 \text{ - початкова температура}$$

мембрани, яку вважаємо однаковою у всьому тілі мембрани.

Зазначимо, що поклавши $l_2 \rightarrow \infty$ отримуємо випадок, коли на зовнішній поверхні мембрани миттєво встановлюється температура $\Theta_2(t) = \text{const}$ тобто мембрана зазнає термоудару.

Як показано [7], з погляду термомеханічних напружень та деформацій, “найжорсткіші” межові умови є такі, коли по зовнішній (контактуючій) поверхні мембрани ($z = 0$) здійснено термоудар, а інші поверхні контактують з середовищами сталої температури. Такі умови можливі у випадку примусового “охолодження” внутрішньої порожнини сенсора. Тоді, виходячи з (1), залежно від інтенсивності теплообміну на периметрі мембрани змінюватиметься градієнт температурного поля за її радіусом. Цей факт має істотне значення, оскільки у випадку існування перепаду температури по товщині мембрани і градієнта температурного поля по радіусу мембрани, вона зазнаватиме прогину. У випадку відсутності градієнта поля вздовж радіуса мембрана не зазнаватиме прогину [8]. Саме таке явище послужило підставою для розроблення низки методів вимірювання тиску середовищ з швидкозмінною температурою [5,6]. Однак, в силу складності точного моделювання термофізичних процесів внаслідок відсутності залежності їх характеру від багатьох факторів, для прийняття адекватних рішень щодо вибору параметрів конструкційних елементів проєктованих сенсорів вкрай необхідне експериментальна перевірка теоретичних аспектів досліджень розроблених сенсорів.

Відомо [7], що динаміка температури у мембрані на її внутрішній площині при дії термоудару $\Delta T = 400^\circ \text{C}$ Залежно від значення нормованого коефіцієнта теплообміну на периметрі мембрани l_1 , має вигляд (рис. 2, рис. 3).

Отримані результати показують, що в радіальному напрямку мембрани градієнт температурного поля мінімізується якщо l_1 спадає. Для забезпечення умови $l_1 \rightarrow 0$ периметр мембрани можна або ізолювати, або матеріал корпусу сенсора оби-

рати з високим коефіцієнтом теплопровідності. Останнім можна забезпечити синхронне проникнення температури в стінці корпусу і по товщині мембрани. Тому обмін температури між корпусом і мембраною мінімізується.

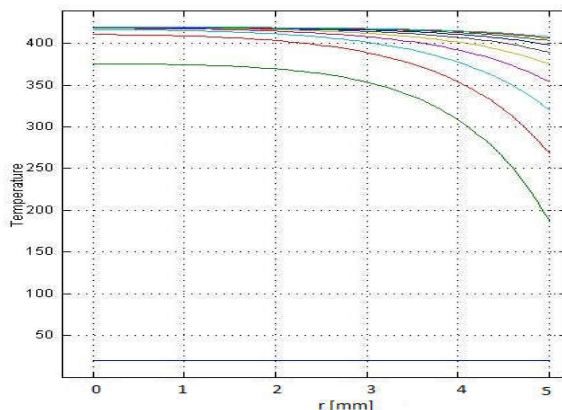


Рис. 2. Динаміка температури на внутрішній поверхні мембрани при нормованому коефіцієнті теплообміну на її периметрі $l_1 = 300 \text{ м}^{-1}$

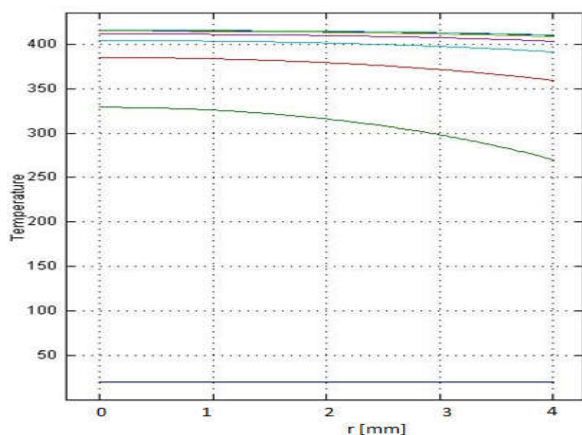


Рис. 3. Динаміка температури на внутрішній поверхні мембрани при нормованому коефіцієнті теплообміну на її периметрі $l_1 = 100 \text{ м}^{-1}$

Експериментальні дослідження

При дослідженні характеру температурного поля по радіусу мембрани при дії нестационарної температури на її внутрішній площині розташовувалися термочутливі елементи (рис. 4).

Після цього сенсор поміщали у скляну колбу, яку вакуумували (рис. 5). Далі колба різко вносила у резервуар з розігрітим газом до температури $420^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$ (температура контролювалась взірцевими термopарами). Внаслідок термонапружень колба руйнувалась, що призводило до термоудару по мембрані сенсора.

Отримані результати, усереднені по 10-ти кратному експерименту подані на рис. 6.



Рис. 4. Сенсор тиску і його мембрана з термочутливими елементами



Рис. 5. Вакуумована колба з сенсором

Висновки

Отримані результати дозволяють зробити ряд принципових висновків:

- динаміка температурного поля у мембрані отримана при “найжорсткіших” межових умовах, що забезпечить коректність результатів при м’якших межових умовах, оскільки, по мірі “прогрівання” всього сенсора радіальна нерівномірність температурного поля може бути ще меншою;
- позбутися градієнту температури вздовж радіуса можна внаслідок термоізоляції мембрани по периметру, або підбором матеріалів мембрани і корпусу таким чином, щоби у місці закріплення мембрани між мембраною і корпусом тепловий потік був мінімальним. Саме останнє і відбуватиметься, якщо матеріал корпусу матиме високу теплопровідність і місце закріплення мембрани “прогріватиметься” практично одночасно з мембраною.
- усталений режим температури настає доволі швидко, а момент його настання, при однакових фізико-механічних константах матеріалу мембрани, залежить від її геометричних параметрів. У проведених експериментах максимальна різниця температури на периметрі мембрани і в її центрі складала $1,6^{\circ}\text{C}$.

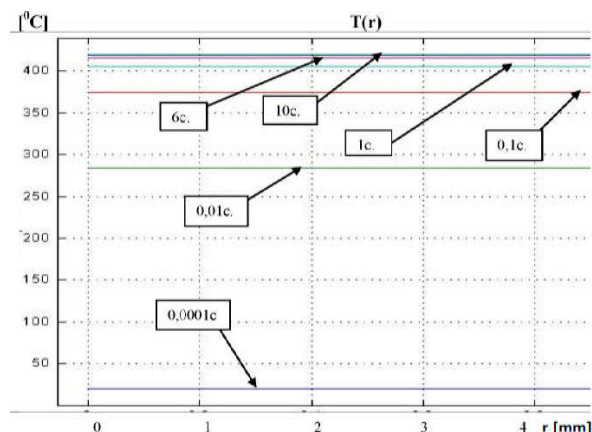


Рис. 6. Динаміка температури на внутрішній поверхні мембрани при нормованому коефіцієнті теплообміну на її периметрі $l_1 \rightarrow 0 \text{ м}^{-1}$

Таким чином, результати дослідження підтверджують припущення, що при відповідних співвідношеннях параметрів мембрани, умов теплообміну на її периметрі, відповідного матеріалу корпусу сенсора температурне поле по поверхні мембрани при дії найбільш швидкозмінної температури-термоудару справді має лінійний характер.

Отримані результати досліджень дозволяють адекватно поставити задачу по розрахунку сенсора тиску, а також дозволяють більш цілеспрямовано провести розробку ефективних способів зменшення термовпливу на процедуру вимірювання і, таким чином, дозволяють проводити розробку ефективних способів вимірювання тиску в умовах нестационарних термовпливів.

Перелік посилань

1. Тихан М. О. Розвиток теоретичних засад та принципів побудови тензорезистивних сенсорів тиску нестационарних середовищ. – Авторефе-

рат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. НУ "Львівська політехніка". Львів, 2013.

2. Дружинін А. О. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук АЗВ5 / А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, О. П. Кутраков // Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Львів: Вид-во Львів. політехніки, 2015. - 231 с.
3. Мокров Е. А., Минимизация погрешности тонкопленочных тензорезистивных датчиков давления при воздействии нестационарной температуры / Е. А. Мокров, Е. М. Белозубов, Д. В. Тихомиров // Датчики и системы. – 2004. - № 1. – С. 26 – 29.
4. Педоренко Н. П. К вопросу о точности измерения давления при воздействии термоудара / Н. П. Педоренко, А. И. Ворожбитов // Датчики систем измерения, контроля и управления: Межвуз. сб. науч. тр. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. техн. ун-та, 1994. – Вып. 13. – С. 92 – 94.
5. Спосіб вимірювання тиску середовища з нестационарною температурою: пат. 85108 Україна: МПК(2006)G01L 23/00 / М.О. Тихан. - № а200701897; заявл. 23.02.2007; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.– 3 с.
6. Спосіб вимірювання тиску середовищ з швидкозмінною температурою: пат. 107072 Україна: МПК(2006) G01L 7/02 G01L 9/04 / М.О. Тихан. -№ а201108662; Бюл.22, 25.11.2014
7. Тихан М. О. Аналіз термомеханічних процесів у мембранах вимірювачів тиску при термоударі / М. О. Тихан // Машинознавство. - Львів. - 2008. – № 8-9. – С. 7 – 15.
8. Boley B., J. Weiner. The theory of thermal stresses -. NY, 1960. -586 p.

УДК 539.3

М. А. Тихан

Национальный университет "Львівська політехніка", г. Львів, Украина

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В МЕМБРАНЕ ТЕНЗОРЕЗИСТИВНОГО СЕНСОРА ДАВЛЕНИЯ

Статья посвящена экспериментальному исследованию температурного поля в мембране тензорезистивного сенсора давления при термоударе. Необходимость таких исследований возникла в связи с разработкой специальных способов измерения давления в средах с нестационарными термовлияниями. В работе подаются главные теоретические аспекты для проведения исследований, в частности подается аналитическое уравнение, описывающее нестационарное температурное поле в мембране. Далее описывается оборудование и ход экспериментальных исследований характера этого поля при термоударе и показаны результаты исследования экземпляра сенсора, предназначенного для измерения давления при нестационарном термовлиянии.

Ключевые слова: тензорезистивный, сенсор, давление, нестационарный, термовлияние, исследование.

М. О. Tykhan

Lviv Politechnic National University, Lviv, Ukraine

EXPERIMENTAL RESEARCH OF TEMPERATURE FIELD IN THE DIAPHRAGM OF PIEZORESISTIVE PRESSURES SENSOR

The article is devoted to experimental research of temperature field in the diaphragm of piezoresistive pressures sensor under thermal shock. The need for such research appeared in connection with the development of special methods of pressure measurement in environments with non-stationary thermal influences. In this article submitted for the main theoretical aspects of research, including analytical equation describing of nonstationary temperature field in the diaphragm. Describes the equipment and experimental research character of this field under thermal shock and shows the results of research instance of sensor designed to measure the pressure under non-stationary thermal influences.

Keywords: piezoresistive, sensor, pressure, non-stationary, termoinfluences, research.

*Надійшла до редакції
26 вересня 2016 року*

*Рецензовано
10 жовтня 2016 року*

© Тихан М. О., 2016